第 37 卷第 7 期 生 态 学 报 Vol.37,No.7
2017 年 4 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Apr.,2017

DOI: 10.5846/stxb201511262389
李莹,黄岁樑.滦河流域景观格局变化对水沙过程的影响.生态学报,2017,37(7):2463-2475.
Li Y, Huang S L.Effects of landscape pattern change on flow and sediment processes in the Luanhe River Basin.Acta Ecologica Sinica,2017,37(7):2463-2475.

滦河流域景观格局变化对水沙过程的影响

李 莹,黄岁樑*
环境污染过程与基准教育部重点实验室,水环境数值模拟研究室,天津市城市生态环境修复与污染防治重点实验室,南开大学环境科学与工程学院, 天津 300350

摘要:以滦河流域为研究区域,基于 SWAT 模型模拟 1976—2012 年滦河流域的水沙过程,分析 2000 年京津风沙源治理项目实施前后流域产水产沙时空格局变化;研究 1980—2010 年流域景观格局变化特征,揭示景观格局变化的水沙响应;应用 Spearman 相关分析法分析流域景观格局变化对水沙过程的影响。结果表明:与 20 世纪 80 年代相比,2010 年流域林地和建设用地增加,其他用地类型减小;流域景观集中程度提高、连通性变优、优势斑块显著、形状趋于规则、多样性减少、破碎化程度降低、景观类型向非均衡方向发展;流域年均地表径流减少 9mm,产水量增加 5.44mm,产沙减小 1.59t/hm^2;地表径流减少区域占全流域 89.32%,产水量增加区域占 76.71%,产沙量减少区域占 93.89%;地表径流、产水、产沙与林地面积呈负相关,产水与草地面积呈正相关,地表径流、产沙与农业用地面积呈正相关;地表径流、产水、产沙与景观形状、Shannon's 均匀度、景观分离度呈正相关,与蔓延度、最大斑块指数呈负相关;产水、产沙与斑块密度和 Shannon's 多样性指数呈正相关;工程治理后,流域年均径流量与产沙量显著下降,产水产沙高值区显著缩小,产沙关键区域仍需治理。

关键词:景观格局;产沙;SWAT 模型;时空分布;滦河流域

Effects of landscape pattern change on flow and sediment processes in the Luanhe River Basin

LI Ying, HUANG Suiliang*
Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria of Ministry of Education, Numerical Simulation Group for Water Environment, Tianjin Key Laboratory of Remediation and Pollution Control for Urban Ecological Environment, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, *China*

Abstract: The Luanhe River Basin is one of the most important sources of sand for sandstorms in Beijing and Tianjin. To alleviate the hazards, a sandification control program for areas near Beijing and Tianjin was carried out in June 2000, which could have changed the landscape pattern of this basin. Firstly, the present study used landscape pattern indices to analyze landscape pattern changes from 1980 to 2010. Secondly, the SWAT model was used to reveal how the changes in landscape pattern influenced the surface runoff, water yield, and sediment yield in 1980 and 2010, and to evaluate the effects of the sandification control program. Additionally, the Spearman Correlation was used to analyze the relationship between landscape pattern changes and flow-sediment process changes. Furthermore, the SWAT model was applied to study the spatial and temporal distribution of the water and sediment yield in the basin before the implementation of the program (1976—1999) and after the implementation of the program (2000—2012), respectively, and identify the critical zones of sediment yield that should be controlled at present in the Luanhe River Basin. The results were as follows: (1) compared

基金项目:国家自然科学基金(51079068);天津市科技支撑计划重点项目(09ZCGYSF00400);天津市应用基础与前沿技术研究计划(15JCYBJC22500)

收稿日期:2015-11-26; **网络出版日期**:2016-08-30

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: slhuang@ nankai.edu.cn

with the area of landscape types in 1980s, forest and construction land increased obviously in 2010, whereas the other land use types decreased in 2010. Compared with the landscape pattern in 1980, increases of splitting index (SPLIT), Contagion Index (CONTAG), Landscape Shape Index (LSI), and Largest Patch Index (LPI), and decreases of Shannon's Diversity Index (SHDI) and Shannon's Evenness Index (SHEI), diversity of landscape patterns and fragmentation, and more regular landscape shapes and imbalanced development of landscape types in 2010 were also observed. (2) Compared with the flow and sediment processes in 1980, annual average surface runoff was significantly reduced in 2010, with a 9 mm decrease, and the decrease in surface runoff accounted for 89.32% of the whole basin; the annual average water yield increased strongly in 2010, with a 5.44mm increase, and areas of the increase in water yield accounted for 76.71% of the basin; average annual sediment yield was obviously reduced, with a decrease of 1.59 t/hm^2, and 93.89% of the basin area showed this trend. (3) Variations in landscape indices were correlated with the processes of flow and sediment well. The surface runoff, water yield, and sediment yield were negatively correlated with the area of forest. The water yield was positively correlated with the area of grassland. The surface runoff and sediment yield were positively dependent on the area of agricultural land. Surface runoff, water yield, and sediment yield were positively correlated with SPLIT, LSI, and SHEI. On the contrary, surface runoff, water yield, and sediment yield were negatively correlated with LPI and CONTAG. Additionally, water and sediment yield both positively correlated with SHDI (Shannon's Diversity Index) and PD (Patch Density). (4) Soil erosion in most zones of Luanhe River Basin has been reduced with the implementation of the program. However, a few zones were still experiencing severe soil erosion that should be taken into account.

Key Words: landscape pattern; sediment yield; SWAT model; temporal-spatial distribution; Luanhe River Basin

景观格局是不同景观镶嵌体在空间上的排列[1],是不同生态系统组成的地理综合体,能有效揭示区域生态状况和空间变异特征[2]。景观格局变化主要是人类活动通过土地利用变化驱动的[3]。景观的空间配置与类型组成影响水循环,从而影响流域系统的水文过程[4-5]。从景观生态学角度探讨流域景观变化的水沙过程响应,能够揭示人类活动对流域水沙的影响。在水资源短缺和水土流失严重的区域,开展此研究,可以为区域土地利用的合理调整、水土保持治理与生态恢复提供科学依据。目前,景观格局变化的水沙过程响应已成为研究热点。Dixon 与 Earls[6]发现佛罗里达州查理溪流域径流随城市扩张而增加;王计平等发现斑块密度是影响黄土丘陵沟壑区产沙的重要指标[1];黄志霖等发现三峡库区景观格局对径流和泥沙影响均显著[7];郭军庭等发现潮河流域灌木林地和草地能够增加径流[8];林炳青等发现晋江流域洪水径流与景观格局相关性显著[4];李晶与周自翔发现延河流域景观格局变化与产沙显著相关[9];郝振纯等分析土地利用情景变化对海河流域典型区域径流的影响[10]。

滦河流域距京津地区约 240km,是京津沙尘暴的重要通道和沙源地之一[11]。北京沙尘绝大部分源自外地,与滦河流域的丰宁和多伦的土壤属性非常相似[12]。为优化京津地区环境质量,2000 年京津风沙源治理工程启动,多伦县为工程发端地[13]。滦河流域位于工程治理区内[14],主要通过土地利用变化影响地表水下渗、蒸散(发)等水文过程,因此,探讨景观格局变化的水文效应,对滦河流域水土流失治理具有重要意义。目前,滦河流域产流产沙相关研究得到广泛关注,研究多集中于径流,研究范围主要为潘家口水库上游[15]与全流域[16];泥沙研究主要针对潘家口水库上游流域[15],较少涉及全流域;水文影响因素主要集中于土地利用与气候变化对径流的影响[17],较少从景观格局变化分析产流产沙。

本文运用景观格局指数分析 1980—2010 年滦河流域景观格局变化特征,结合 SWAT 模型探讨景观格局变化的流域水沙过程响应;应用 Spearman 相关分析法分析景观格局变化对水沙过程的影响;应用 SWAT 模型模拟 1976—2012 年滦河流域径流与泥沙,分析流域 2000 年治理工程实施前后多年年均产流与产沙的时空格局变化,识别流域仍需重点治理的产沙关键源区,以期为滦河流域的后续治理与土地利用规划提供科学依据。

1　研究区域、方法与数据来源

1.1　研究区域

滦河流域位于华北北部,滦河全长 888km,流域总面积为 44750km^2(图 1)。滦河发源于河北丰宁,流经内蒙古、河北及辽宁的 7 市(盟)的 27 个县(区)[18]。滦河流域属于典型温带大陆性季风气候,年均气温 5—12℃,多年平均降水量为 400—700mm,主要集中分布于 7—8 月。滦河流域地形起伏较大,由西北向东南倾斜,分为坝上高原、燕山山地、南部平原 3 种地貌类型。流域内主要土地利用类型为林地、草地和农业用地。流域土壤类型丰富,主要包括草甸土、森林土、栗钙土、棕壤、潮土和褐土等[19]。

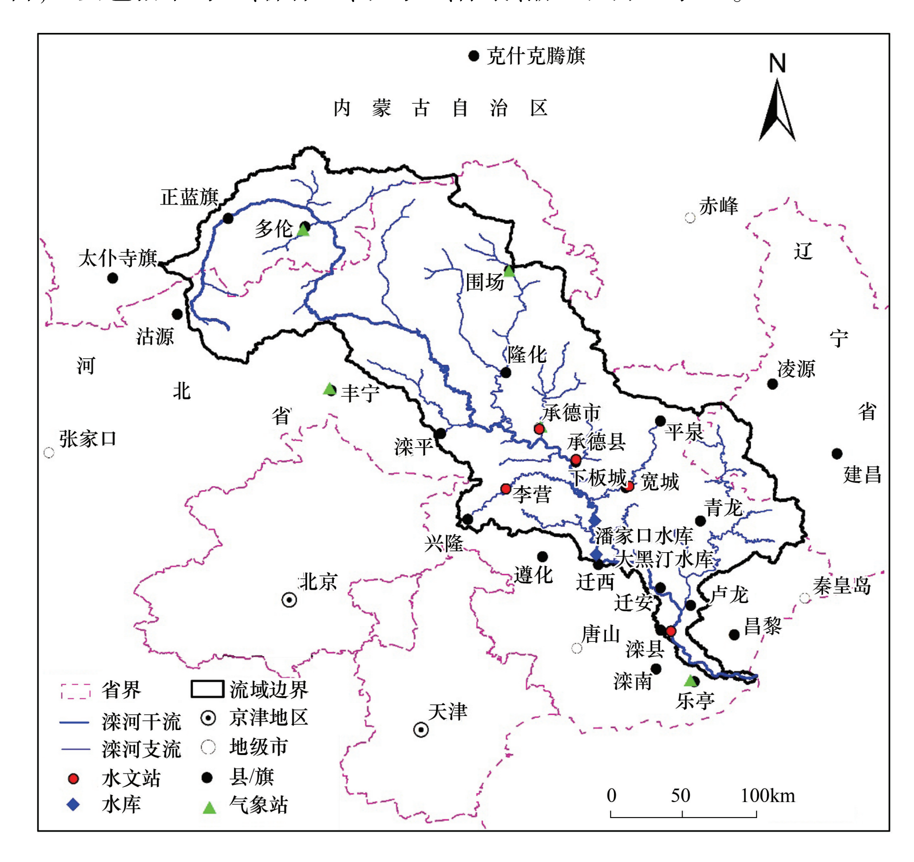


图 1　滦河流域位置图

Fig.1　Location of Luanhe River Basin

1.2　数据来源与处理

DEM:90m 分辨率,来源于美国地质勘探局(USGS)。根据流域情况与相关研究[15,17],设定最小集水面积阈值为 20000ha,流域划分为 116 个子流域,以子流域为基础单元研究产水产沙的空间分布特征。根据土壤、土地利用、坡度的分布特征,面积阈值分别设定为 15%、10%、15%,生成 1521 个 HRU,充分体现了滦河流域下垫面的空间不均匀性。

土地利用数据:1980s 土地利用图,分辨率 1km,来源于地球系统科学数据共享平台;2010 年土地利用数据源于分辨率 30m 的 TM 数据(轨道号为 121/32,121/33,122/31,122/32,123/31,124/31),来源于 USGS。运用 ENVI 4.8 和 ArcGIS 9.3,经过镶嵌、拼接等处理,采用人机交互解译影像,并重采样为 1km 分辨率。依据土地资源分类系统[20],采用国家标准体系,分为林地、草地、农业用地、水域、建设用地和未利用地六类。依据数据可获得性、研究目的以及 20 世纪 80 到 90 年代土地利用变化相对缓慢[21],采用 1980s 土地利用数据用于 1976—1999 年时间段的模拟;同样地,2010 年土地利用数据用于 2000—2012 年时间段的模拟。

土壤数据:1:100 万的世界土壤数据库(HWSD)来源于寒区旱区科学数据中心。土壤水文分组根据在完

全湿润并不冻的条件下土壤最小渗透属性来确定[22];土壤容重等采用 SPAW 软件进行计算。

气象数据:来源于中国气象科学数据共享服务网,包括多伦、丰宁、围场、承德、乐亭 5 个气象站 1961—2012 年的日降水、气温、风速等。利用上述气象数据建立天气发生器,输入数据由 pcpSWAT 和 dewSWAT 软件得出[8]。

水文数据:1976—1991 年承德、下板城、李营、宽城、滦县 5 个水文站的月径流量、潘家口和大黑汀水库月出流数据和滦县站泥沙数据,来源于滦河流域水文年鉴等资料。

SWAT 模型空间数据统一采用 Albers 等积投影。借鉴相关研究[15-17],90m 分辨率 DEM 满足流域水系的正确划分;1km 分辨率土地利用图与土壤图适用于流域水沙过程模拟。

1.3 研究方法

1.3.1 SWAT 模型

SWAT 模型的开发目的是模拟与预测具有复杂变化的土壤、土地利用和管理方式的较大流域中土地利用及管理方式对流域产流、产沙及污染物负荷的影响。文中选用 SCS 径流曲线数方法计算地表径流,泥沙由改进的 MUSLE 方法计算,采用 Penman-Monteirh 方法计算潜在蒸发量,马斯京根方法进行河道演算。采用 SWAT2009 的敏感性分析模块中全局参数敏感性分析方法(LH-OAT)进行径流和泥沙参数敏感性分析[23]。运用 SWAT-CUP 软件的 t 检验方法进行参数的深层筛选[24];依次校准径流与泥沙,通过 SWAT-CUP 的 SUIF-2 方法[24]对径流进行初步率定后手动调参;泥沙校准采用手动调参。

Nash-Suttcliffe 系数(Ens),决定系数(R^2)和相对误差(Re)为模型适用性评价指标。当 Ens>0.5,R^2>0.5,Re<20%时,径流模拟结果是满意的;Re<55%时,泥沙模拟结果是满意的[25]。

1974—1975 年为预热期,1976—1983 年作为模型校准期,1984—1991 年为验证期。利用 1992—2012 年气象数据、1980s 和 2010 年土地利用数据和已率定参数,得到 1992—2012 年径流与泥沙模拟数据。借鉴相关研究经验[17]:保持气象、土壤等输入条件不变,仅改变土地利用条件时,水文模型输出结果差异仅是由土地利用变化造成的。本文以相同的气象、地形、土壤、水库出流等条件,分别输入 1980s 和 2010 年土地利用图,模拟和分析景观格局变化的水沙响应,评价工程治理前后流域水土流失变化。

针对上述假设,采用 2000—2012 年气象数据,满足假设中相同气象条件。研究区面积较大,2000—2012 年全流域尺度地形地貌变化、土壤类型变化皆可忽略,满足假设中相同的地貌与土壤条件。滦河干流建设了潘家口和大黑汀水库,支流的小型水库对流域整体水文过程影响较小,因此主要考虑潘、大水库(分别由 1981 年、1983 年开始运行至今[16,26]),满足相同的水利工程条件。可见假设合理,研究方法可行。

1.3.2 景观格局分析

运用 ENVI 4.8 计算景观类型面积变化特征;利用 FRAGSTATS 3.3 软件分析流域景观格局指数变化;应用 Spearman 相关分析法[4],分析流域水沙过程变化与景观格局指数变化的相关关系。

考虑相关文献中对水沙影响较大、意义明确且相对独立的景观指数[4],本文选取斑块类型面积(CA)、斑块密度(PD)、景观形状指数(LSI)、Shannon 多样性指数(SHDI)、Shannon 均匀度指数(SHEI)、分离度(SPLIT)、最大斑块指数(LPI)和蔓延度(CONTAG),分别反映景观类型面积、形状复杂度、破碎化程度、多样性与连通性。

统计 1980 年、2010 年全流域和各子流域景观指数,并计算全流域和各子流域 1980—2010 年景观格局的变化率,计算公式为:

$$P_i = \frac{F_{i,2010} - F_{i,1980}}{F_{i,1980}} \times 100\% \qquad (1)$$

式中,P_i为 i 类景观格局指数变化率,$F_{i,2010}$为 2010 年景观格局下 i 类景观格局指数,$F_{i,1980}$为 1980s 景观格局下 i 类景观格局指数。

2　结果与分析

2.1　模型的校准与验证

如表 1 所示,各水文站控制的子流域中敏感性因子对径流的敏感度存在差异,这与研究区面积较大,地形、土地利用与土壤类型多样有关。然而在所有子流域中,径流曲线系数 CN2 的敏感度均较高,这与其他研究相一致[15-17],此参数直接影响径流的大小,值越高径流量越大。

模型校准与验证结果见图 2、表 2,Ens 和 R^2 均达到 0.7 以上。径流模拟效果较好,泥沙模拟与实测值的过程线也趋于一致,但丰水年的泥沙模拟值低于实测值,特别是洪水期。这主要由于 SWAT 模型在产沙量高于 2000t 时会产生低于实际值的模拟结果[27],而滦河流域年均产沙量约为 112 万 t,远高于 2000t。此外,强降水时段模拟值也会低于实测值[28],尤其是洪峰期的误差最大[29]。

综上,SWAT 模型模拟径流与泥沙的精度均达到要求。滦河流域面积较大,研究区上游的滦河源头为冬春季的风蚀与夏季的水蚀互为动力,但水蚀仍是全流域最主要的土壤侵蚀过程[30],SWAT 模型适用于土壤、土地利用等具有复杂变化的滦河流域水沙模拟研究。

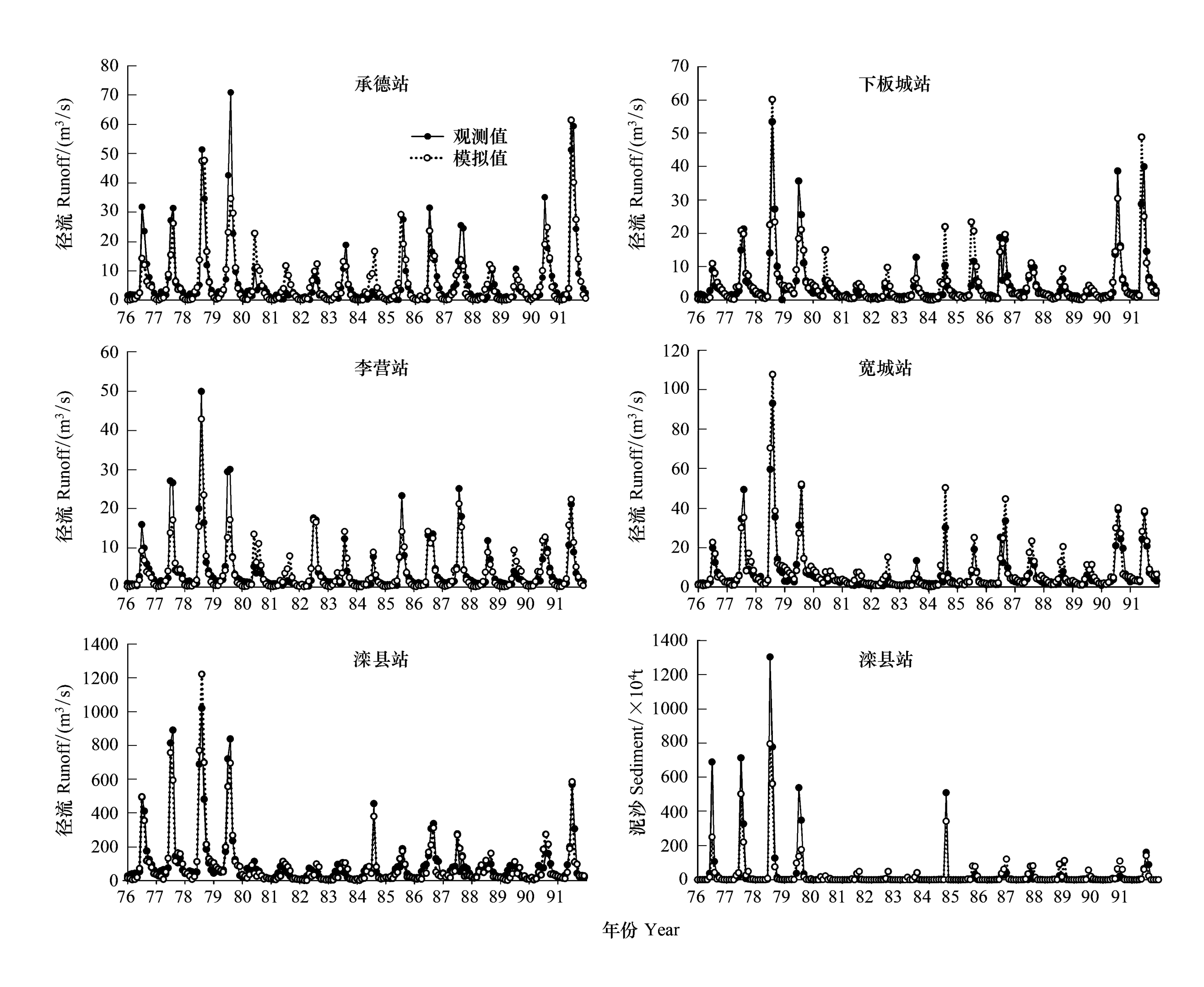


图 2　承德站、下板城站、李营站、宽城站、滦县站月径流与滦县站(f)月泥沙模拟

Fig.2　Monthly simulated and observed runoff for: the Chengde station, the Xiabancheng station, the Liying station, the Kuancheng station, the Luanxian station; monthly simulated and observed sediment for the Luanxian station

表 1 径流和泥沙模拟敏感参数最佳值

Table 1 Optional values of sensitive parameters for runoff and sediment

参数 Parameter	最佳值 Calibrated value					t					P				
	承德	下板城	李营	宽城	滦县	承德	下板城	李营	宽城	滦县	承德	下板城	李营	宽城	滦县
土壤蒸发补偿系数 ESCO	0.884	0.905	0.972	0.780	0.902	-0.65	-0.17	3.63	-2.62	-1.59	0.52	0.86	0.00	0.01	0.11
径流曲线系数 CN2	2.96%	20.35%	15.93%	12.04%	17.00%	4.11	-8.11	11.56	-2.87	-1.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11
主河道曼宁系数 CH_N2	0.130	0.122	0.131	0.215	0.024	-1.28	2.24	1.59	0.01	-1.44	0.20	0.02	0.11	0.99	0.15
河道有效水电导率 CH_K2	10.124	40.003	63.542	27.877	110.625	-3.13	0.22	-1.20	0.29	-1.51	0.00	0.82	0.23	0.77	0.13
河岸调蓄的基流系数 ALPHA_BNK	0.825	0.059	0.518	0.182	0.755	8.05	-3.95	7.96	-0.98	0.18	0.00	0.00	0.00	0.33	0.86
地下水再蒸发系数 GW_REVAP	0.132	0.161	0.174	0.080	0.098	-1.99	-2.77	-3.86	0.69	2.08	0.05	0.01	0.00	0.49	0.04
浅层地下水径流系数 GWQMN	0.277	1.616	0.077	0.972	1.637	-3.53	1.55	-3.72	2.50	0.23	0.00	0.12	0.00	0.01	0.82
地下水滞后系数 GW_DELAY	31.558	304.355	34.900	476.576	298.100	-1.14	0.99	-4.72	0.08	1.50	0.26	0.32	0.00	0.94	0.14
基流系数 ALPHA_BF	0.793	0.503	0.112	0.623	0.808	-0.26	-1.23	1.93	-0.19	0.79	0.79	0.22	0.05	0.85	0.43
土壤有效水容量 SOL_AWC	57.10%	-20.17%	28.50%	1.03%	-9.30%	0.73	0.90	-0.91	1.31	1.60	0.46	0.37	0.37	0.19	0.11
土壤饱和水电导率 SOL_K	10.77%	21.71%	-5.60%	110.63%	56.80%	5.87	-2.08	8.73	-3.62	-0.48	0.00	0.04	0.00	0.00	0.63
土壤含水容重 SOL_BD	17.84%	-6.00%	12.15%	4.80%	5.18%	9.94	-0.44	10.82	-5.84	-7.53	0.00	0.66	0.00	0.00	0.00
挟沙能力计算的待定线性系数 SPCON	—	—	—	—	0.0095	—	—	—	—	16.96	—	—	—	—	0.00
挟沙能力计算的待定幂指数 SPEXP	—	—	—	—	1.4625	—	—	—	—	0.65	—	—	—	—	0.51
主河道沉积传输径流峰值调整因子 PRF	—	—	—	—	1.20	—	—	—	—	13.49	—	—	—	—	0.00
水土保持措施因子 USLE_P	—	—	—	—	0.525	—	—	—	—	2.55	—	—	—	—	0.01

t 值代表敏感的程度,其绝对值越大,模型参数越敏感;p 值代表敏感性的显著性,其值越接近于 0 越显著,模型参数越敏感[24];ESCO:Soil evaporation compensation factor;CN2:SCS runoff curve number for moisture condition II;CH_N2:Manning's 'n' value for main channel;CH_K2:Effective hydraulic conductivity in main channel;ALPHA_BNK:Base flow alpha factor for bank storage;GW_REVAP:Ground water 'revap' coefficient;GWQMN:Threshold water depth in the shallow aquifer;GW_DELAY:Groundwater delay time;ALPHA_BF:Base flow alpha factor;SOL_AWC:Soil available water capacity;SOL_K:Saturated hydraulic conductivity;SOL_BD:Moist bulk density;SPCON:Linear re-entrainment parameter for channel sediment routing;SPEXP:Exponent of re-entrainment parameter for channel sediment routing;PRF:Peak rate adjustment factor for sediment routing in the channel;USLE_P:USLE equation support practice (P) factor.

表 2　径流和泥沙的校准与验证结果

Table 2　Calibrated and validated results of runoff and sediment

类型 Type	水文站 Hydrologic station	校准期 Calibration period			验证期 Validation period		
		Ens	R^2	Re /%	Ens	R^2	Re /%
径流 Runoff	承德	0.73	0.73	8.20	0.72	0.74	-3.45
	下板城	0.87	0.86	1.19	0.73	0.73	-0.72
	李营	0.81	0.82	12.27	0.80	0.87	0.80
	宽城	0.95	0.95	-10.01	0.75	0.85	-19.38
	滦县	0.94	0.92	5.22	0.74	0.80	14.09
泥沙 Sediment	滦县	0.74	0.93	40.41	0.75	0.71	-40.32

2.2　治理工程前后产流与产沙的时空分布特征

2.2.1　时间分布特征

2000 年京津风沙源治理以来,年均径流量和产沙量比 1976—1999 年分别减少 74.26%与 90.25%,而降水量仅减少 3.84%(图 3),表明人类活动(流域治理)是影响滦河流域径流与泥沙的主要因素。这是由于影响径流量变化的主要因素为气候变化和人类活动,气候因素主要表现为降水变化,人类活动主要为消耗用水和土地利用变化[21]。相关研究也认为流域治理是径流量减少的重要原因[16],其中以水保措施改变下垫面的影响量约为消耗用水的 2 倍[31]。

工程开展前后,年径流与泥沙均主要集中于滦河流域的汛期(6—9 月),7—8 月径流与泥沙量最大,约为年径流与泥沙量的 44%和 84%,治理后 7—8 月的洪峰径流显著下降,工程实施对年内洪峰流量的调蓄效果显著(图 4)。

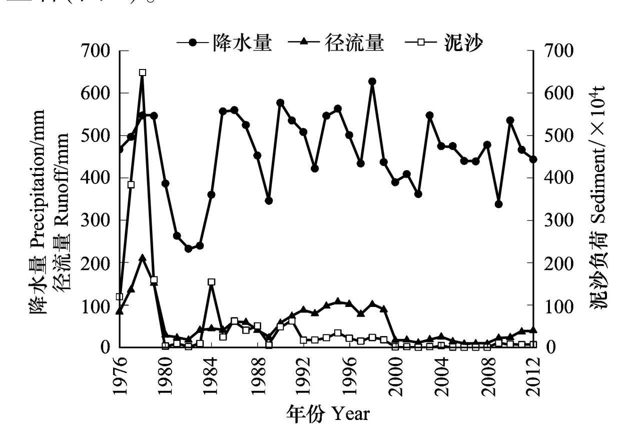


图 3　1976—2012 年的径流与泥沙年际变化趋势

Fig.3　Inter-annual trend of precipitation, runoff and sediment from 1976 to 2012 in the Luanhe River Basin

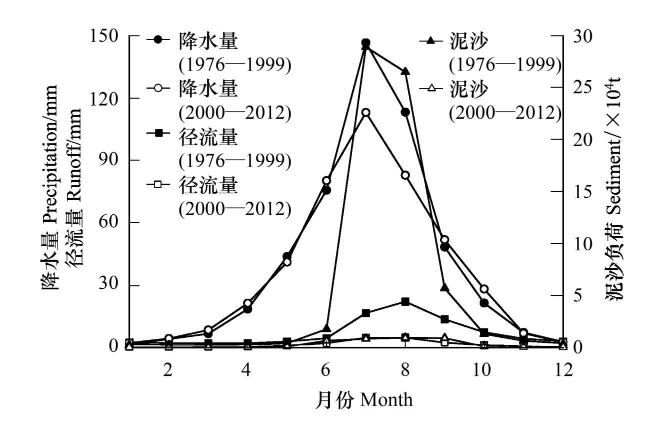


图 4　月均径流与泥沙的变化趋势

Fig.4　Distribution of mean monthly runoff and sediment in the Luanhe River Basin

2.2.2　空间分布特征

工程实施后,产水与产沙的高值区显著缩小(图 5、图 6)。1976—1999 年,下游多数区域的径流深大于 150mm;2000—2012 年,只有位于下游入海口附近的 3 个子流域径流深大于 150mm,而中上游出现年均产水量小于 50mm 的区域,如沽源县(34、35 号子流域)等(图 5)。

如图 6 所示,工程实施前,流域年均产沙模数大于 10 t/hm² 的区域位于下游的青龙县;工程实施后,年均产沙模数大于 10 t/hm² 的区域已消失,而 2000 年以后流域中上游的大部分区域年均产沙模数小于 1 t/hm²。仍需重点治理的区域主要为滦河上游的沽源(35 号子流域)、丰宁(33、38 号子流域)、围场(28 号子流域)与隆化(42 号子流域);中游的滦平(71 号子流域)、承德市(71、74 号子流域)、承德县(75、77 号子流域)、平泉(68、75 号子流域)、凌源(68 号子流域);下游的迁安与卢龙(114 号子流域)。

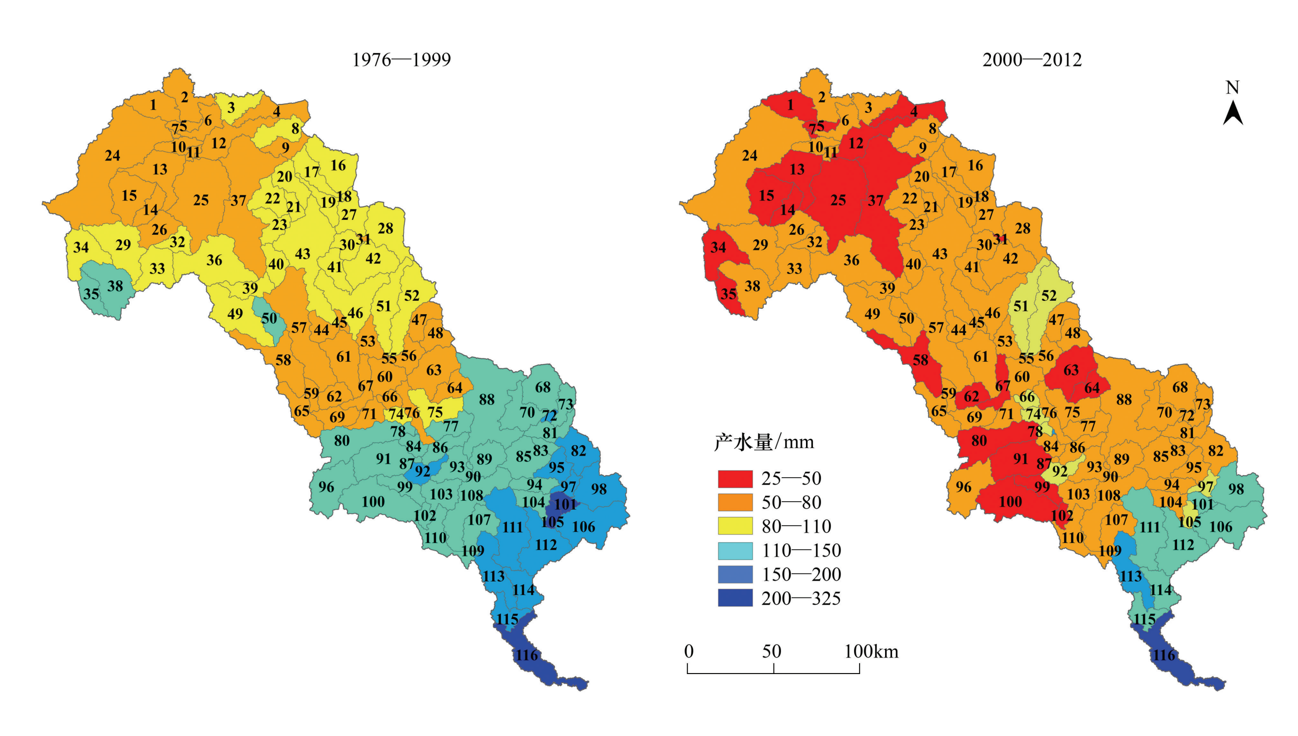


图 5 1976—1999 年与 2000—2012 年的产水量空间分布

Fig.5 The spatial distribution map of simulated annual average water yield from 1976 to 1999 and during 2000 to 2012

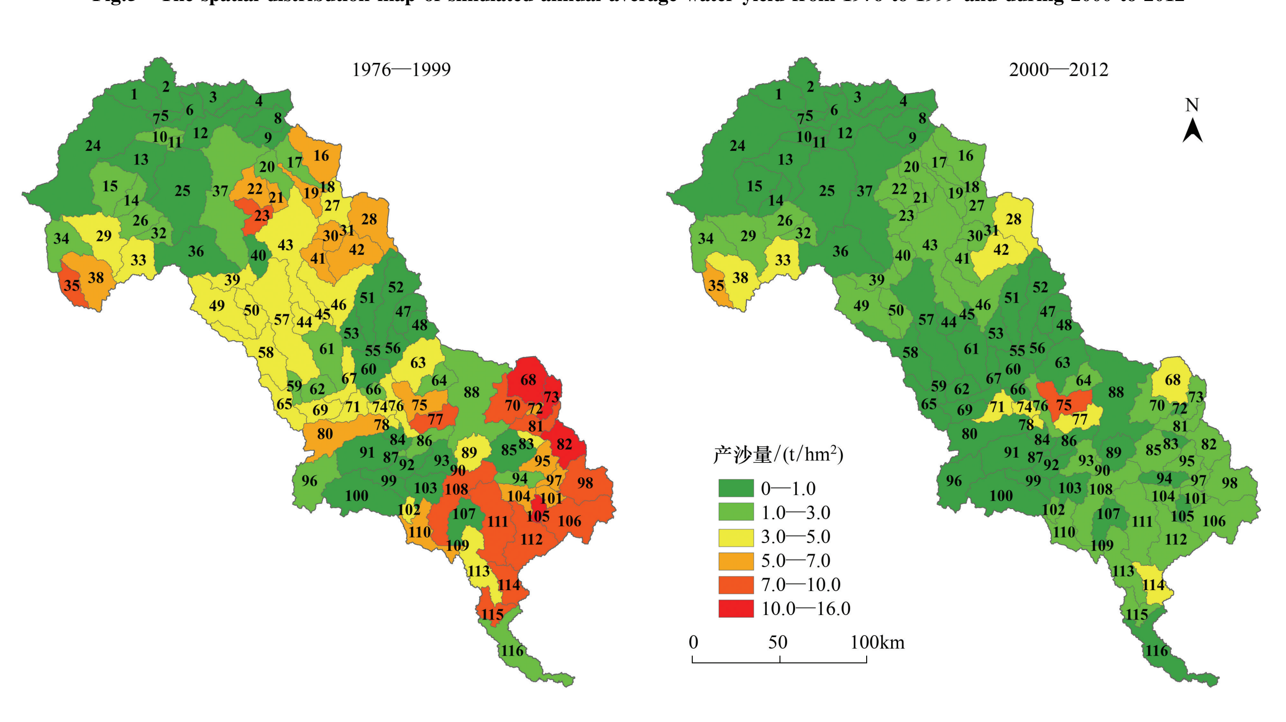


图 6 1976—1999 年与 2000—2012 年的产沙量空间分布

Fig.6 The spatial distribution map of simulated annual average sediment yield from 1976 to 1999 and during 2000 to 2012

2.4 滦河流域治理与景观格局变化

与 20 世纪 80 年代相比,2010 年林地、建设用地分别增加 41.40%、577.82%;农业用地、草地、未利用地和水域分别减少 26.99%、41.76%、0.50%与 36.88%(表 3)。这与流域治理工程关系密切,1980—1989 年,流域上游开展人工造林 4700km^2,建设草场 200km^2[32];2000 年国家水土保持重点项目京津风沙源治理工程启动后,采取人工造林、改良草场、提高植被覆盖度等措施建立高质量的流域生态防护,治理成绩显著,如多伦县造

林 565km^2[13];正蓝旗造林 262km^2、草地治理 445km^2[33];承德县造林 148 km^2,治理 252km^2[34];丰宁造林 138km^2,治理 248km^2[35];围场退耕还林 665km^2[36];滦平县森林覆盖度提高 15.4%,治理面积 950km^2[37]等。

与 80 年代相比,2010 年流域分离度和形状复杂度显著降低,景观多样性和均匀度略有降低;斑块密度变化不大;最大斑块指数、蔓延度显著上升(表 4),说明林草建设与修复工程促进流域景观破碎化降低,景观分布更集中,斑块形状更规则,景观连通性提高、景观类型向非均衡方向发展,林地景观优势更显著。

表 3　1980—2010 年景观类型转移矩阵

Table 3　Transition matrixes of different landscape types from 1980 to 2010

景观类型 Landscape type	林地 Forest	草地 Grassland	水域 Water	农业用地 Agriculture land	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land	2010 年
林地 Forest/km^2	16006.38	6583.98	244.77	3626.65	15.54	167.22	26644.54
草地 Grassland/km^2	1237.64	4539.96	249.78	1525.47	8.13	309.87	7870.85
水域 Water/km^2	46.32	147.65	256.08	173.34	2.03	4.29	629.71
农业用地 Agriculture land/km^2	1171.28	1715.23	200.15	4402.18	31.43	87.25	7607.52
建设用地 Construction land/km^2	189.15	220.41	17.2	635.58	120.69	22.27	1205.3
未利用地 Unused land/km^2	192.26	307.75	29.72	57.16	0	205.19	792.08
1980 年/km^2	18843.03	13514.98	997.7	10420.38	177.82	796.09	44750

表 4　1980—2010 年景观指数变化分析

Table 4　Analysis of landscape metrics from 1980 to 2010

景观指数 Landscape metrics	斑块密度 PD	最大斑块面积 LPI	蔓延度 CONTAG	分离度 SPLIT	Shannon′s 多样性 SHDI	Shannon′s 均匀度 SHEI	斑块形状 LSI
1980	0.05	15.01	39.91	14.37	1.24	0.69	43.27
2010	0.06	56.48	45.79	3.02	1.12	0.62	30.62

PD:Patch Density; LPI: Largest Patch Index; CONTAG: Contagion Index; SPLIT: Splitting Index; SHDI: Shannon′s Diversity Index; SHEI: Shannon′s Evenness Index; LSI: Landscape Shape

2.5　景观格局变化的水沙过程响应

如图 7 所示,与 20 世纪 80 年代相比,2010 年流域年均地表径流减少 9mm;109 个子流域地表径流减小,面积约 39971km^2,占全流域的 89.32%。流域年均产水量增加 5.44mm;85 个子流域产水量增加,面积约 34326.18km^2,占全流域的 76.71%。流域年均产沙减小 1.59t/hm^2;104 个子流域产沙减小,面积约 42015.37km^2,占全流域的 93.89%。可见,滦河流域水土保持治理能够很好地调节地表径流,减少泥沙。

2.5.1　景观格局变化的地表径流响应

与 20 世纪 80 年代相比,2010 年地表径流减少最显著的区域主要位于上游 16、35 号子流域,中游 63、74 号子流域,下游 97、98、101 号等子流域(图 7、表 5)。这些区域地表径流减少与林草植被建设密切相关。例如 63、74 号子流域位于承德县境内,实施京津风沙源治理工程以来,承德县调整产业结构退耕还林还果、造林育林,全县森林覆盖率达到 61%[34],有效拦蓄降水,减少地表径流。

2010 年仅 12 个子流域地表径流增加(图 7)。如 113 号子流域,位于迁安境内,地表径流增加最显著。迁安市经济依托于铁矿资源,矿山排土场和尾矿库在堆放过程中导致绿化率较低。虽然进行综合治理,但是由于植物种类与苗龄选择不当、栽植方式与时间不合理,因而植被覆盖率仍然较低,而且河道两侧山体上的排土场无法进行清除,难以采取水保措施[38],水土流失愈加严重,因而地表径流增加。

2.5.2　景观格局变化的产水响应

与 1980 年相比,2010 年产水量增加最显著区域主要位于研究区上游 2、3、6、10、13 号子流域,中游 66、107、108 号子流域和下游 106、109、111、113—115 号子流域(图 7、表 5)。产水减少区域主要位于滦河上游的 16、17、19 号等子流域,中游的 48、51、58 号等子流域,下游的 101、104、105、116 号子流域。在产水量增加的子

流域中,如 1—9 等子流域地表水是减少的(图 7),这些区域多数由于水土保持治理程度提高,地表径流减少时大量转化补充土壤含水量与地下径流。在产水量减少的子流域中,如流域上游的围场、沽源与丰宁境内 16、17、29 号等子流域地表水也是减少的(图 7),这是由于沽源县植被覆盖以草地为主、丰宁与围场的林地建设仍需继续开展,地表径流仍为产水的主要组成部分,壤中流与地下径流的增加程度尚显不足。

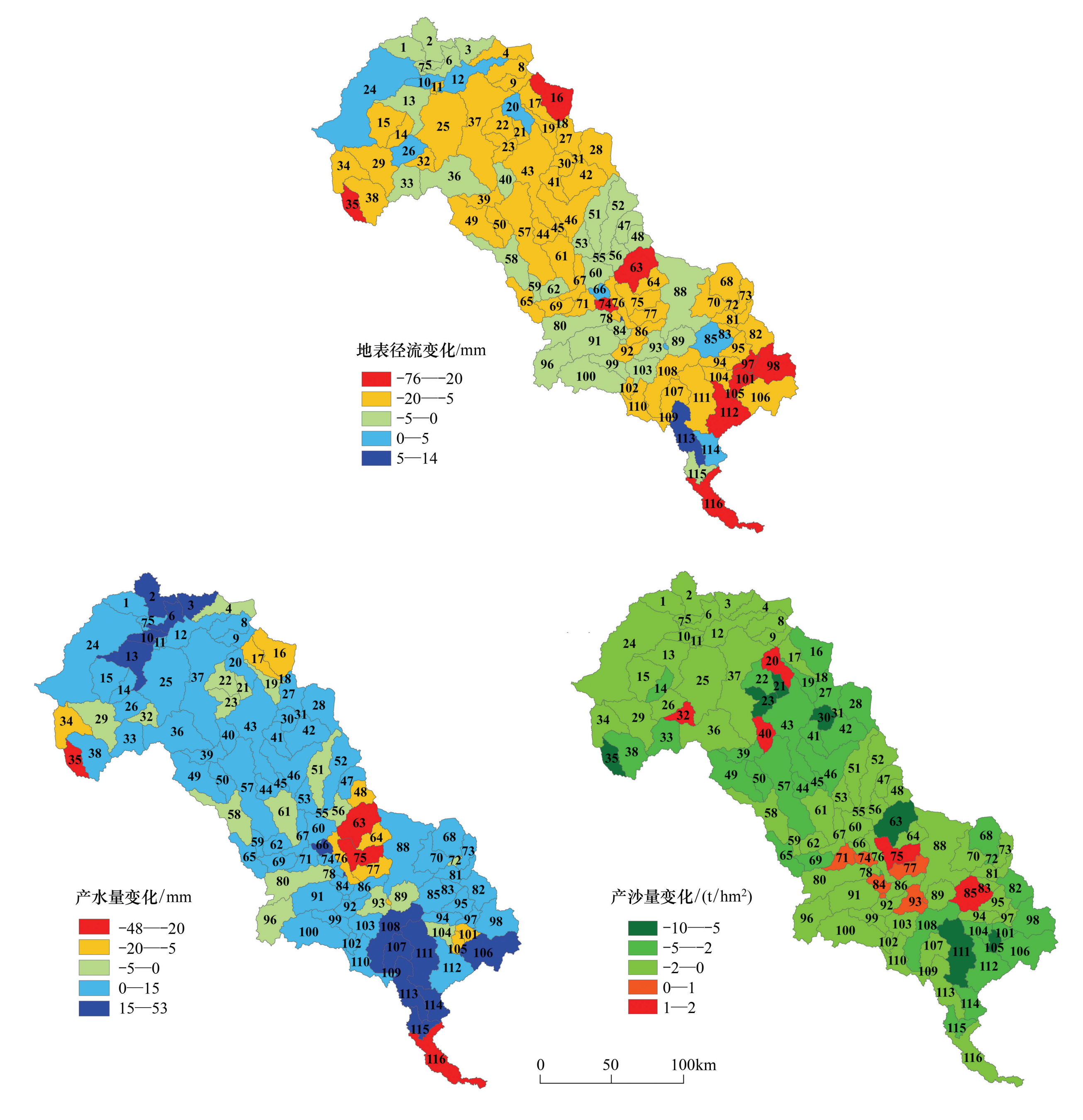


图 7 滦河流域 1980—2010 年年均地表径流、产水量、产沙量变化的空间分布

Fig.7 Spatial distribution of average yearly surface runoff, water yield and sediment yield from 1980 to 2010

2.5.3 景观格局变化的产沙响应

与 20 世纪 80 年代相比,2010 年景观格局下,产沙减少相对较显著的区域主要位于滦河流域上游的 21、23、30、35 号子流域,中游 63 号子流域和下游的 105、111 号子流域(图 7、表 5)。结果表明,这些区域水土保持治理效果最显著,土壤侵蚀程度大大降低。例如 63 号子流域,位于承德县东北部,产沙量与地表径流明显减少,这与承德全县森林覆盖率增加有关[34],森林覆盖率增加能够改善地表径流、抑制产沙。

表 5　地表径流、产水与产沙变化的空间分布

Table 5　Spatial distribution of surface runoff, water yield and sediment yield changes

类型 Type	变化 Chang	子流域 Subbasin	所在区域(县、区、旗) Location
地表径流 Surface runoff	减少最显著	16、35、63、74、97、98、101、105、112、116	围场、沽源、承德市双桥区、承德县、青龙、建昌、迁安、卢龙
	增加最显著	79、113	承德县、迁安
产水量 Water yield	减少最显著	35、63、75、116	沽源、承德县、滦县、卢龙、昌黎、滦南与乐亭
	增加最显著	2、3、6、10、13、66、79、106—109、111、113—115	正蓝旗、克什克腾旗、多伦、承德市双桥区、宽城、迁西、青龙县、迁安、卢龙、滦县
产沙量 Sediment yield	减少最显著	21、23、30、35、63、105、111	围场、沽源、承德县、青龙、建昌、迁西
	增加最显著	20、32、40、75、85	丰宁、围场、隆化、宽城

产沙增加的子流域仅 12 个,最显著的位于流域上游的 20、32、40 号子流域,中游 75、85 号子流域(图 7、表 5)。2010 年,20、32、40 号子流域林地减少被农业用地占用;75、85 号子流域草地减少被农业用地占用。林地、草地减沙,农业用地增沙,因而水土流失严重、产沙增加。

2.6　景观格局对水沙过程的影响

景观类型与水沙过程相关性见表 6,林地与地表径流、产水量和产沙量呈负相关关系,说明滦河流域林地面积增加对径流和泥沙都具有积极抑制作用,这是由于森林植被的下渗与蒸发量较大,可以有效的调节地表径流与洪峰流量,且土壤含水量的增加也将减少泥沙的产生与输移[39]。草地面积与产水量呈正相关,与产沙呈负相关,表明草地面积的增加会促进产流、减少产沙,主要由于草地能将坡面径流流速减小 40%、将起流时间推迟 3 倍,增加径流入渗率、土壤含水量和地下水,从而增加产流[40];草地的植被根系存在于土壤表层,提高土壤对径流侵蚀产沙的抵抗力。农业用地与地表径流、产沙量均呈正相关,由于农业用地的土壤结构被破坏,降低了径流下渗速率、土壤含水量和地下水补给[41],促使地表径流增加;而耕地植被覆盖度较低,水土流失也相对容易。建设用地与未利用地与产沙相关性较弱,可能与两者面积小有关。

表 6　滦河流域景观格局指数变化与产流产沙变化间的相关性

Table 6　The correlation coefficients among landscape metrics and water and sediment yield

类型 Type	景观格局指数 Landscape metrics	地表径流 Surface runoff	产水量 Water yield	产沙量 Sediment yield
景观类型 Landscape type	林地 Forest	-0.640**	-0.505**	-0.738**
	草地 Grassland	0.320	0.633**	-0.452**
	水域 Water	0.023	0.078	0.036
	建设用地 Construction land	0.029	0.119	0.203*
	未利用地 Unused land	0.001	-0.005	0.184*
	农业用地 Agriculture land	0.382*	-0.053	0.586**
景观水平 Landscape level	斑块密度 PD	0.184	0.323**	0.425**
	景观形状指数 LSI	0.213*	0.280**	0.401**
	最大斑块指数 LPI	-0.594*	-0.627*	-0.634**
	Shannon′s 多样性指标 SHDI	0.15	0.557**	0.533**
	Shannon′s 均匀度指数 SHEI	0.537*	0.524**	0.488**
	分离度 SPLIT	0.414**	0.327**	0.422**
	蔓延度指数 CONTAG	-0.276**	-0.355**	-0.254**

**表示相关显著水平为 0.01(双尾检测),*表示相关显著水平为 0.05(双尾检测)

地表径流、产水、产沙与景观形状复杂程度、Shannon′s 均匀度、景观分离度呈正相关,与蔓延度、最大斑块指数呈负相关;景观斑块密度和 Shannon′s 多样性指数与产水产沙呈正相关(表 6)。表明大力营造林草地后,景观形状规则化、连通度增加、流域优势景观类型林地增加,导致流域降水截留能力与水源涵养能力增强,地

表径流、产水和产沙降低。

3 结论

（1）与 80 年代相比，2010 年滦河流域林地、建设用地增加，其他用地类型减小；流域斑块密度变化不明显，景观集中连片度提高、连通性变优、优势斑块类型明显、破碎化降低、景观形状越来越规则、多样性程度减少，景观类型向非均衡方向发展。

（2）不同景观格局下，滦河流域水沙过程差异显著。与 1980 年相比，2010 年流域年均地表径流减少 9mm，产水量增加 5.44mm，产沙减小 1.59t/hm^2。年均地表径流减少区域占全流域的 89.32%，主要位于流域上游的沽源和围场，中游的承德县和承德市双桥区，下游的青龙、建昌、迁安与入海口的三角洲地区；流域年均产水量增加区域占全流域 76.71%，主要位于流域上游的正蓝旗、克什克腾旗、多伦，中游的承德市双桥区和宽城，下游的迁西、青龙、迁安、卢龙与滦县；年均产沙减少区域占全流域的 93.89%，位于上游沽源和围场、中游承德县与下游的青龙和迁西。

（3）地表径流、产水、产沙与林地面积呈负相关；产水、产沙与草地面积分别呈正、负相关；地表径流、产沙与农业用地呈正相关；地表径流、产水、产沙与景观形状复杂程度、Shannon′s 均匀度、分离度呈正相关，与蔓延度、最大斑块指数呈负相关；产水产沙与景观斑块密度、Shannon′s 多样性指数呈正相关。

（4）京津风沙源治理工程开展以来，年均径流量和产沙量显著减少，汛期径流与泥沙明显降低；产水与产沙高值区显著缩小。中上游大部分区域年均产沙小于 1 t/hm^2，大于 10 t/hm^2 的区域已消失。产沙关键源区仍需重点治理，应继续加强林草建设，提高植被质量与覆盖率；对陡坡耕地实施退耕还林，对严重沙化耕地实施退耕还草；集约化用地等；更应重视有利于防治泥沙输出的景观类型（如林地、草地）的空间聚集程度、延展性、连接度与规则形状。

参考文献（References）：

[1] 王计平，杨磊，卫伟，陈利顶，黄志霖. 黄土丘陵沟壑区景观格局对流域侵蚀产沙过程的影响——斑块类型水平. 生态学报，2011，31（19）：5739-5748.

[2] 张大伟，李杨帆，孙翔，张方山，朱红兴，刘毅，张英，庄敏，朱晓东. 入太湖河流武进港的区域景观格局与河流水质相关性分析. 环境科学，2010，31（8）：1775-1783.

[3] 胡震峰. 土地利用与景观格局动态变化研究. 科技情报开发与经济，2003，13（12）：143-145.

[4] 林炳青，陈兴伟，陈莹，刘梅冰. 流域景观格局变化对洪枯径流影响的 SWAT 模型模拟分析. 生态学报，2014，34（7）：1772-1780.

[5] Cai T，Li Q F，Yu M X，Lu G B，Cheng L P，Wei X. Investigation into the impacts of land-use change on sediment yield characteristics in the upper Huaihe River Basin，China. Physics and Chemistry of the Earth，Parts A/B/C，2012，53-54：1-9.

[6] Dixon B，Earls J. Effects of urbanization on streamflow using SWAT with real and simulated meteorological data. Applied Geography，2012，35（1/2）：174-190.

[7] 黄志霖，田耀武，肖文发，马德举. 三峡库区典型农林流域景观格局对径流和泥沙输出的影响. 生态学报，2013，33（23）：7487-7495.

[8] 郭军庭，张志强，王盛萍，Peter S，姚安坤. 应用 SWAT 模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响. 生态学报，2014，34（6）：1559-1567.

[9] 李晶，周自翔. 延河流域景观格局与生态水文过程分析. 地理学报，2014，69（7）：933-944.

[10] 郝振纯，苏振宽. 土地利用变化对海河流域典型区域的径流影响. 水科学进展，2015，26（4）：491-499.

[11] 李令军，高庆生. 2000 年北京沙尘暴源地解析. 环境科学研究，2001，14（2）：1-3.

[12] 孙业乐，庄国顺，袁蕙，张兴赢，郭敬华. 2002 年北京特大沙尘暴的理化特性及其组分来源分析. 科学通报，2004，49（4）：340-346.

[13] 王阿拉坦仓，王男，王燕山，陶元圣. 多伦县环京津风沙源治理工程建设初探. 内蒙古林业调查设计，2012，35（5）：40-41.

[14] 国家林业局. 京津风沙源治理工程规划（2001-2010）［2015-11-08］. http://wenku.baidu.com/view/09dc470216fc700abb68fce2.html? from =search

[15] 万超. 潘家口水库上游流域面源污染的模拟研究［D］. 北京：清华大学，2002.

[16] 张利平，李凌程，夏军，王任超. 气候波动和人类活动对滦河流域径流变化的定量影响分析. 自然资源学报，2015，30（4）：664-672.

[17] 曾思栋，夏军，杜鸿，张利平，陈向东，王任超，Sood A. 气候变化、土地利用/覆被变化及 CO_2浓度升高对滦河流域径流的影响. 水科学

进展, 2014, 25(1): 10-20.
[18] 史晓亮, 杨志勇, 严登华, 李颖, 袁喆. 滦河流域土地利用/覆被变化的水文响应. 水科学进展, 2014, 25(1): 21-27.
[19] 王刚, 严登华, 张诚, 秦天玲. 滦河流域土壤有机质的空间分布特征分析. 安徽农业科学, 2011, 39(28): 17254-17257.
[20] 陈百明, 周小萍.《土地利用现状分类》国家标准的解读. 自然资源学报, 2007, 22(6): 994-1003.
[21] 魏兆珍, 冯平. 基于可变模糊集理论的滦河流域降雨径流演变特征分析. 水利学报, 2011, 42(9): 1051-1057.
[22] 李迪. 基于SWAT模型的东辽河流域农业非点源污染模拟研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
[23] Nossent J, Bauwens W. Multi-variable sensitivity and identifiability analysis for a complex environmental model in view of integrated water quantity and water quality modeling Water Science and Technology, 2012, 65 (3): 539-549.
[24] Abbaspour K C. SWAT-CUP2. SWAT calibration and uncertainty programs, Version 2. SWAT, 2009.
[25] Moriasi D N, Arnold J G, Van L M W, Bingner R L, Harmel R D, Veith T L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3): 885-900.
[26] 杨德富. 大黑汀水利枢纽工程改造与资源开发. 水利水电工程设计, 1996, 15(4): 29-32.
[27] Benaman J, Shoemaker C A. An analysis of high-flow sediment event data for evaluating model performance. Hydrological Processes, 2005, 19 (3): 605-620.
[28] Xu Z X, Pang J P, Liu C M, Li J Y. Assessment of runoff and sediment yield in the Miyun Reservoir catchment by using SWAT model. Hydrological Processes, 2009, 23(25): 3619-3630.
[29] Rostamian R, Jaleh A, Afyuni M, Mousavi S F, Heidarpour M, Jalalian A, Abbaspour K C. Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran. Hydrological Sciences Journal, 2008, 53(5): 977-988.
[30] 岳树堂, 申万明, 乔光建. 河北省土壤侵蚀类型及时空分布特征分析. 南水北调与水利科技, 2010, 8(3): 83-87.
[31] 王亮, 高瑞忠, 刘玉才, 张娜, 李凤玲. 气候变化和人类活动对滦河流域内蒙段河川径流的影响分析. 水文, 2014, 34(3): 70-79.
[32] 王少明. 滦河上游地区水土流失与面污染源的治理. 水利水电科技进展, 1997, 17(3): 50-51.
[33] 郭磊, 陈建成, 王顺彦. 正蓝旗京津风沙源治理工程综合效益评价. 经济研究参考, 2006(30): 39-44.
[34] 于海琴. 承德县水土流失现状及防治措施. 河北水利, 2013(8): 27-27.
[35] 丁明星, 韩秀峰, 张永, 敖玉强, 屈志成. 丰宁县实施环京津风沙源治理1期工程水利项目的成效与做法. 海河水利, 2012(6): 24-26.
[36] 池树学, 李博涛. 围场京津风沙源治理的成效与经验. 国土绿化, 2012(7): 43-43.
[37] 赵金成, 杨九军, 武成军. 强化农林水协调配合实现京津工程综合治理——河北省滦平县京津风沙源治理工程调研报告. 林业经济, 2013(1): 85-86, 106-106.
[38] 郑连合, 李文霞, 白燕, 郭宇光. 迁安市矿山水土保持存在问题及治理措施. 中国水利, 2010(14): 36-37.
[39] 石培礼, 李文华. 森林植被变化对水文过程和径流的影响效应. 自然资源学报, 2001, 16(5): 481-487.
[40] 冯浩, 吴淑芳, 吴普特, 李敏. 草地坡面径流调控放水试验研究. 水土保持学报, 2005, 19(6): 23-25, 109-109.
[41] Moussa R, Voltz M, Andrieux P. Effects of the spatial organization of agricultural management on the hydrological behaviour of a farmed catchment during flood events. Hydrological Processes, 2002, 16(2): 393-412.